

Agricultura inteligente: Revisão literária sobre a tendência global e evolução no Centro-Oeste Brasileiro

Smart farming: A literature review on the global trend and evolution in the Brazilian Midwest

Agricultura inteligente: Revisión de la literatura sobre la tendencia global y evolución em en el Centro-Oeste Brasileño

Luiz A. Agapito

University of Antwerp, Belgium
luiz.agapito2@student.uantwerpen.be

RESUMO

A agricultura inteligente, também conhecida como agricultura digital ou de precisão, tem recebido crescente atenção devido ao seu potencial para aumentar a produtividade, promover a sustentabilidade ambiental e otimizar a gestão de recursos naturais. Este artigo analisa a tendência global de adoção da agricultura inteligente, com um foco específico em seu desenvolvimento na região Centro-Oeste do Brasil. Com uma metodologia qualitativa baseada em revisão de literatura e análise de dados secundários, o estudo identifica práticas, inovações, incentivos e barreiras associados à adoção da agricultura inteligente nos empreendimentos agrícolas. Diferentemente de abordagens que a tratam apenas como um conjunto de tecnologias, este artigo posiciona a agricultura inteligente como um modelo de gestão holístico, que não apenas eleva a eficiência agrícola, mas também contribui para a segurança alimentar e a sustentabilidade na produção. O estudo aborda uma lacuna importante na literatura, relacionada à falta de distinção entre a simples adoção de inovações tecnológicas – muitas vezes desconectadas do parque tecnológico existente – e um modelo de gestão integral e adaptativo. Ademais, revela-se um desnível na conscientização dos benefícios da agricultura inteligente entre diferentes perfis de produtores. A originalidade deste trabalho reside em defender que a agricultura inteligente deve ultrapassar a adoção isolada e não planejada de tecnologias, propondo, ao invés, um modelo de gestão integrada e adaptada às características da região e fazenda.

Palavras-chave: Agricultura inteligente, gestão holística, segurança alimentar.

ABSTRACT

Smart farming, or digital or precision agriculture, has garnered increasing attention due to its potential to boost productivity, promote environmental sustainability, and optimize natural resource management. This article examines global trends in adopting smart agriculture, specifically focusing on its development in Brazil's Central-West region. The study uses a qualitative methodology based on a literature review and secondary data analysis to identify practices, innovations, incentives, and barriers associated with adopting smart farming across agricultural enterprises. Unlike approaches that treat smart farming merely as a set of technologies, this article frames it as a holistic management model that enhances agricultural efficiency and contributes to food security and sustainable production. The study addresses a significant gap in the literature, namely the lack of distinction between the simple adoption of technological innovations—often disconnected from existing technological infrastructure—and a comprehensive, adaptive management model. Furthermore, the study reveals disparities in awareness of the benefits of smart farming among different profiles of producers. The originality of this work lies in its argument that smart farming should go beyond the isolated and unplanned adoption of technologies, advocating instead for an integrated management model tailored to regional and farm-specific characteristics.

KEYWORDS: *Smart agriculture, holistic management, food security*

RESUMEN

La agricultura inteligente, también conocida como agricultura digital o de precisión, ha ganado creciente atención debido a su potencial para aumentar la productividad, promover la sostenibilidad ambiental y optimizar la gestión de los recursos naturales. Este artículo examina las tendencias globales en la adopción de la agricultura inteligente, con un enfoque específico en su desarrollo en la región Centro-Oeste de Brasil. Con una metodología cualitativa basada en revisión de literatura y análisis de datos secundarios, el estudio identifica prácticas, innovaciones, incentivos y barreras asociadas con la adopción de la agricultura inteligente en los emprendimientos agrícolas. A diferencia de enfoques que tratan la agricultura inteligente únicamente como un conjunto de tecnologías, este artículo la plantea como un modelo de gestión holístico, que no solo aumenta la eficiencia agrícola, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria y a la sostenibilidad en la producción. El estudio aborda una importante laguna en la literatura, relacionada con la falta de distinción entre la simple adopción de innovaciones tecnológicas, muchas veces desconectadas del parque tecnológico existente, y un modelo de gestión integral y adaptativo. Además, se evidencian disparidades en el nivel de concienciación sobre los beneficios de la agricultura inteligente entre distintos perfiles de productores. La originalidad de este trabajo radica en su propuesta de que la agricultura inteligente debe trascender la adopción aislada y no planificada de tecnologías, proponiendo, en cambio, un modelo de gestión integrada adaptado a las características regionales y específicas de cada finca.

PALABRAS CLAVE: Agricultura inteligente, gestión holística, seguridad alimentaria

1 INTRODUÇÃO

O rápido avanço da tecnologia nas últimas décadas revolucionou vários setores, e a agricultura não é exceção. A agricultura inteligente representa uma mudança significativa nas práticas agrícolas, integrando automação e sistemas de informação para melhorar a produtividade, a sustentabilidade e a eficiência dos recursos (Wolfert et al., 2017; Klerkx et al., 2019). Essa transformação oferece soluções para desafios globais como segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e uso eficiente dos recursos naturais, que estão sob crescente pressão devido ao crescimento populacional e às mudanças climáticas (Godfray et al., 2010).

A agricultura inteligente facilita a coleta de dados em tempo real sobre condições do solo, saúde das culturas, padrões climáticos e necessidades de irrigação, possibilitando intervenções mais precisas que minimizam desperdícios e o impacto ambiental (Eastwood et al., 2019; Poppe et al., 2013). Com isso, torna-se um componente essencial dos sistemas agrícolas modernos, promovendo maior rendimento, redução de custos e práticas sustentáveis (Rose & Chilvers, 2018). Apesar de seu potencial, a adoção dessas tecnologias é desigual entre regiões e tipos de fazendas. Nos Estados Unidos, Europa e Austrália, fazendas de grande escala adotaram essas tecnologias, impulsionadas por incentivos econômicos e infraestrutura digital (Schimmelpfennig, 2016; Higgins & Bryant, 2020). Em contraste, a adoção em regiões como África, Sudeste Asiático e partes da América do Sul é limitada por altos custos iniciais, falta de conhecimento técnico e infraestrutura digital precária (Kerneck et al., 2020; Sanders et al., 2022). No Brasil, o maior exportador mundial de commodities como soja e milho, a adoção de tecnologias inteligentes tem crescido na região Centro-Oeste, onde grandes fazendas utilizam tratores com GPS, sistemas de irrigação de precisão e drones para otimizar a produtividade (Pivoto et al., 2018). Contudo, pequenos e médios produtores enfrentam desafios significativos devido a restrições financeiras, falta de treinamento e conectividade limitada (Silva et al., 2011).

Através de uma revisão sistemática da literatura, este estudo explora as tendências globais de adoção da agricultura inteligente, com foco no Centro-Oeste brasileiro, abordando duas questões principais: (1) Quais fatores influenciam a adoção da agricultura inteligente nos principais centros agrícolas globais? (2) Como fatores regionais específicos afetam sua adoção? A partir de uma revisão da literatura, o estudo busca identificar barreiras e oportunidades para expandir a adoção da agricultura inteligente e enfrentar desafios globais.

2 OBJETIVO: REVISÃO LITERÁRIA

A literatura demonstra que, em países desenvolvidos, a agricultura inteligente é amplamente compreendida como um sistema de gestão integrada. Eastwood, Klerkx et al. (2019) descrevem a agricultura inteligente como um conceito abrangente de gestão, no qual a análise de dados e a automação permitem que os agricultores tomem decisões baseadas em dados, com impacto positivo em toda a cadeia produtiva. Outros estudos, como os de Higgins & Bryant (2020) e Wolfert et al. (2017), ressaltam que essa abordagem integrada permite maior precisão e sustentabilidade nas operações agrícolas, consolidando-se como um modelo de gestão mais eficaz do que a adoção de tecnologias de forma isolada. Em regiões com políticas agrícolas avançadas e infraestrutura robusta, como na América do Norte e Europa, observa-se

uma maior aceitação da agricultura inteligente como um sistema integrado, beneficiado por apoio governamental, financiamento acessível e capacitação técnica (Say et al., 2018; Tey & Brindal, 2012). Estes fatores facilitam a implementação de práticas agrícolas sustentáveis e economicamente vantajosas. Em contraste, em países em desenvolvimento, a adoção é muitas vezes fragmentada, especialmente entre pequenos agricultores que enfrentam desafios significativos, como falta de acesso a financiamento, infraestrutura limitada e pouca formação técnica. No Brasil, particularmente no Centro-Oeste, a agricultura inteligente desponta como uma estratégia relevante, especialmente para grandes propriedades focadas na produção de soja, milho e algodão. A região tem adotado tecnologias como monitoramento via satélite, sistemas automatizados de irrigação e plantio de precisão, buscando elevar a competitividade e a sustentabilidade. No entanto, como destacam Pivoto et al. (2018), essa adoção é desigual: enquanto grandes propriedades dispõem de recursos para implementar sistemas integrados, pequenos agricultores enfrentam barreiras como restrições financeiras e limitações na infraestrutura de conectividade e capacitação técnica, dificultando a adoção completa de uma agricultura inteligente.

Esta revisão literária sistemática visa explorar as condições que favorecem ou restringem a adoção da agricultura inteligente em diferentes centros agrícolas ao redor do mundo, com um foco especial no Brasil. O objetivo é entender como a agricultura inteligente, quando implementada como um sistema de gestão holístico, pode otimizar o uso de insumos, aumentar a resiliência e promover práticas agrícolas sustentáveis. A partir de uma análise detalhada da literatura, buscamos identificar as influências contextuais e barreiras que impactam essa adoção, especialmente em países em desenvolvimento.

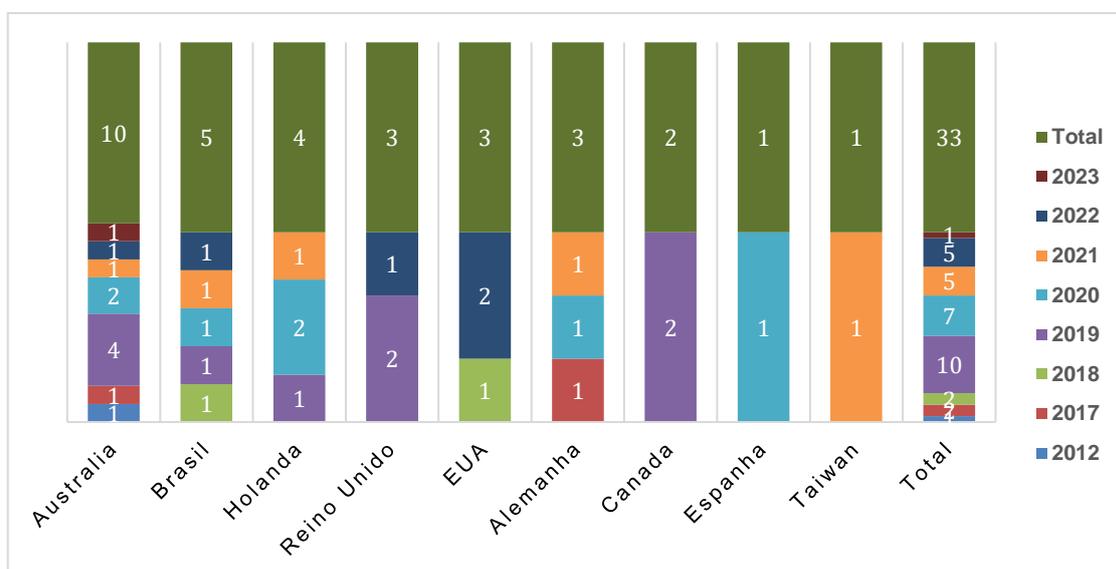
2.1. Metodologia

Este estudo conduz uma revisão sistemática da literatura para analisar a adoção de tecnologias agrícolas inteligentes, com especial atenção ao Brasil. A revisão sistemática utiliza a literatura como dados para responder as questões de pesquisa, permitindo codificação, análise e síntese para alcançar conclusões gerais (Ridley, 2012). Fink (2019) define essa metodologia como um processo sistemático, explícito e reproduzível para identificar, avaliar e sintetizar a produção acadêmica existente, sendo amplamente aplicada na agregação de dados quantitativos e qualitativos (Fischer et al., 2017) e, mais recentemente, na análise de tendências em campos de pesquisa (Barth & Rieckmann, 2015; Ceulemans et al., 2015).

Para capturar uma visão global abrangente e sem restrições de idioma, a literatura foi extraída da base de dados Scopus, utilizando termos de busca como “*smart farming*,” “*precision agriculture*,” “*digital agriculture*,” “*smart farming technologies*,” “*precision agricultural technologies*,” e “*advances in smart farming*”. A busca resultou em 255 artigos acadêmicos revisados por pares, publicados entre 2018 e 2023 em periódicos classificados na categoria “WoS” e redigidos em inglês, cada um com um mínimo de 10 citações. Após a seleção, os artigos foram organizados no software EndNote (versão 21), onde seus resumos e conclusões foram lidos, anotados e categorizados por temas e grupos. Essa análise preliminar destacou 33 artigos-chave (Figura 1) que moldaram a estrutura da revisão da literatura e indicaram fontes adicionais de literatura, através das referências bibliográficas desses estudos. Os 33 artigos selecionados foram então importados para o software NVivo (versão 14) para possibilitar uma análise

qualitativa e o processo de codificação. Dentre os grupos de códigos resultantes, o grupo “adoção” emergiu como fundamental para a análise, orientando a discussão sobre o conceito de agricultura inteligente, a conscientização de suas vantagens entre tomadores de decisão do setor agrícola, as tendências de adoção nos principais polos agrícolas globais e os incentivos e barreiras à sua implementação. A revisão também integra estudos de caso de países em distintos estágios de adoção da agricultura inteligente, incluindo Brasil, Austrália, Alemanha, China e Índia, permitindo uma comparação detalhada das variações regionais nas taxas de adoção, dos desafios enfrentados pelos pequenos agricultores e do impacto das políticas governamentais na facilitação ou restrição da adoção tecnológica.

Figura 1 – Os 33 artigos críticos por país de origem e ano de publicação



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A agricultura inteligente como adoção de soluções tecnológicas, ou como um conceito de gestão, está sendo adotada em ritmos diferentes em todo o mundo. Fatores como tamanho da fazenda, infraestrutura digital, políticas governamentais e condições econômicas regionais influenciam o ritmo de adoção. Dentre significativas vantagens da aplicação do conceito de gestão inserido na interpretação da agricultura, destaca-se sua crucialidade para enfrentar os desafios globais de segurança alimentar (*food security*)¹ e produção sustentável de alimentos.

Com a expectativa de que a população mundial atinja 9,7 bilhões até 2050, a pressão sobre a agricultura global para produzir mais alimentos de forma sustentável é imensa. As

¹ A definição oficialmente adotada de segurança alimentar (*Food security*) (desde a Cúpula Mundial da Alimentação de 1996) diz que a segurança alimentar existe quando todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso físico e econômico a alimentos seguros e nutritivos suficientes que atendam às suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável. A segurança alimentar sustentável exigirá (a) a disponibilidade de alimentos ou produção suficiente de alimentos; (b) acesso a alimentos e a capacidade de comprar alimentos; (c) Suficiência em termos de nutrição, incluindo energia, proteínas e micronutrientes, bem como segurança; e (d) a estabilidade e a previsibilidade dessas condições (Helland, J., & Sørbrø, G. M. (2014). Food securities and social conflict. *CMI Report*.

tecnologias agrícolas inteligentes oferecem soluções otimizando o uso de recursos, melhorando a eficiência do rendimento e minimizando o desperdício, garantindo assim que alimentos suficientes sejam produzidos para atender às crescentes demandas. A agricultura inteligente também pode aumentar significativamente a produção segura e sustentável de alimentos (*food safety*)², fornecendo dados em tempo real sobre a saúde e o status das culturas e do gado. Tecnologias como sensores IoT, drones e sistemas de monitoramento automatizados permitem que os agricultores rastreiem riscos de contaminação, detectem pragas e monitorem surtos de doenças antes que eles se espalhem. Isso resulta em processos de produção de alimentos mais seguros, reduzindo o risco de produtos contaminados entrarem na cadeia de suprimentos. A agricultura de precisão ajuda a minimizar o uso excessivo de produtos químicos, como fertilizantes e pesticidas, que podem levar a resíduos nocivos nos alimentos. Ao aplicar esses insumos em quantidades precisas e somente quando necessário, os agricultores podem produzir alimentos mais seguros e de maior qualidade, ao mesmo tempo em que protegem o meio ambiente. Além disso, as tecnologias agrícolas inteligentes melhoram a rastreabilidade dos alimentos, garantindo que os produtos alimentícios possam ser rastreados da fazenda à mesa. Essa rastreabilidade é fundamental para gerenciar recalls de alimentos, garantir a conformidade com os regulamentos de segurança alimentar e construir a confiança do consumidor. Ao integrar práticas inteligentes, a agricultura pode se tornar a pedra angular da segurança alimentar, garantindo que alimentos sejam produzidos o suficiente para atender a demanda essencial, de forma segura e sustentável.

3.1. Tendência global

A agricultura inteligente se divide em duas abordagens principais: a adoção de tecnologias específicas e a implementação de um sistema de gestão integrado. A primeira, comum em diversos contextos, envolve o uso de tecnologias isoladas para aumentar a produtividade, ainda que sem integração total. No Centro-Oeste brasileiro, por exemplo, grandes fazendas utilizam satélites para monitoramento de safras e definir cronogramas de plantio e colheita. No entanto, essa aplicação fragmentada limita os benefícios, que são potencializados quando as tecnologias operam de forma integrada. Por exemplo, o uso de GPS para plantio é muito mais eficiente quando combinado com análise de dados e irrigação automatizada, garantindo a distribuição ideal de água e nutrientes (Eastwood et al., 2017).

Apesar de seus benefícios, a adoção da agricultura inteligente enfrenta barreiras globais. O custo elevado das tecnologias ainda é um desafio significativo, especialmente para pequenos agricultores em regiões em desenvolvimento. Balafoutis et al. (2017) observam que o custo de aquisição e manutenção só é viável se resultar em ganhos substanciais de produtividade ou economia, o que nem sempre ocorre. A falta de capacitação técnica e suporte especializado também limita o uso otimizado dessas inovações, conforme discutido por Klerkx e Rose (2020). Além disso, a ausência de compatibilidade entre sistemas de diferentes fabricantes impede a integração eficiente, necessária para o gerenciamento eficaz da fazenda (Eastwood et al., 2017). A fragmentação tecnológica é um problema recorrente que reduz a

² Historicamente, a produção de alimento saudável para consumo humano (*Food safety*) alimentar tem sido descrita como o conceito de que os alimentos não causarão danos ao consumidor quando preparados e consumidos de acordo com o uso pretendido (BS-EN-ISO-22000. (2005). Food Safety management systems–Requirements for any organization in the food chain. In *BSI, London*.

eficácia da agricultura inteligente. Sem uma estratégia de gestão abrangente, a adoção isolada de tecnologias resulta em abordagens desarticuladas, limitando os benefícios e o retorno sobre o investimento. Klerkx, Jakku e Labarthe (2019) enfatizam a importância de uma integração sistêmica para maximizar o impacto positivo dessas inovações.

Por outro lado, a agricultura inteligente como conceito de gestão prioriza uma abordagem integrada e baseada em dados, que transforma fundamentalmente a gestão agrícola. Esse modelo aplica dados, automação e inteligência em todas as etapas, do plantio à colheita, permitindo decisões informadas e maximizando a eficiência e sustentabilidade. Eastwood et al. (2017) e Wolfert et al. (2017) descrevem essa abordagem como um sistema unificado em que dados em tempo real informam decisões sobre manejo do solo, uso da água, saúde das culturas e alocação de mão de obra. A gestão integrada otimiza recursos essenciais, como terra e água, e aumenta a produtividade de forma sustentável, conforme observado por Fountas et al. (2015). A agricultura inteligente também melhora a precisão nas decisões. A coleta e análise de dados em tempo real, por exemplo, permite o acionamento automático de sistemas, como irrigação, reduzindo desperdício e custos operacionais (Bongiovanni e Lowenberg-DeBoer, 2004). Outro benefício dessa abordagem é sua escalabilidade e adaptabilidade, permitindo sua aplicação tanto em pequenas propriedades quanto em grandes operações, conforme apontado por Wolfert et al. (2017).

Finalmente, a sustentabilidade de longo prazo é uma vantagem fundamental da gestão integrada. Zhang et al. (2002) destacam que, ao promover o uso responsável dos recursos naturais e a otimização contínua, a agricultura inteligente contribui para a lucratividade e sustentabilidade do setor, beneficiando tanto os agricultores quanto o meio ambiente.

3.1.1. América do Norte

Nos Estados Unidos e Canadá, a agricultura inteligente é impulsionada por grandes fazendas comerciais que utilizam tecnologias avançadas, como tratores autônomos, drones e irrigação automatizada, para melhorar o monitoramento de culturas e gado e a eficiência no uso de recursos. Esse modelo é ideal para o cenário de agricultura em larga escala, onde o uso de dados e automação aumenta a produtividade e reduz o impacto ambiental (Relf-Eckstein et al., 2019; Miller et al., 2019). O apoio governamental e o investimento privado têm sido cruciais, com programas do USDA e incentivos fiscais ajudando na pesquisa e acesso às tecnologias, que são essenciais para a competitividade e sustentabilidade do setor (Schimmelpfennig, 2016; Eastwood & Renwick, 2020). O tamanho das propriedades permite absorver os custos de implementação e facilita a expansão das tecnologias.

Entretanto, fazendas menores enfrentam barreiras como altos custos iniciais e falta de habilidades técnicas, dificultando sua adoção. A ausência de padrões de interoperabilidade agrava esses desafios, tornando a integração em sistemas gerenciais complexa para pequenas operações. Soluções que promovam capacitação e acesso facilitado são fundamentais para democratizar a agricultura inteligente e beneficiar agricultores de diferentes escalas (Bronson, 2019; Paustian & Theuvsen, 2017).

3.1.2. Europa

Na Europa, países como Alemanha, Dinamarca e Holanda estão na vanguarda da agricultura inteligente, adotando sistemas de automação, robótica e IoT para aumentar a sustentabilidade e eficiência agrícola. Essas tecnologias otimizam o manejo de culturas e reduzem impactos ambientais (Paustian & Theuvsen, 2017). Programas como a Política Agrícola Comum (PAC) e o Horizonte 2020 são fundamentais para essa expansão, fornecendo subsídios, bolsas de pesquisa e incentivos financeiros para inovação, além de apoiar a infraestrutura digital em áreas rurais (Eastwood et al., 2019; Kernecker et al., 2020). A modernização do setor agrícola é também um componente-chave da estratégia europeia para redução de emissões de carbono e sustentabilidade no longo prazo. Contudo, a implementação encontra desafios, particularmente para pequenas propriedades no sul e leste europeu. Os custos elevados e a infraestrutura limitada dificultam a adoção de tecnologias avançadas em áreas menos desenvolvidas (Lambert et al., 2015; Reichardt & Jürgens, 2009). O apoio contínuo à capacitação técnica e a incentivos específicos para pequenas operações são essenciais para reduzir as disparidades regionais.

3.1.3. Ásia

A agricultura inteligente na Ásia é impulsionada por China, Japão, Coreia do Sul e Índia, que adaptam essas tecnologias para atender à crescente demanda por alimentos e enfrentar escassez de recursos e desafios climáticos. A China lidera em investimentos com sensores de solo, drones e irrigação automatizada, especialmente em cultivos essenciais como arroz e vegetais, visando a segurança alimentar e sustentabilidade (Li, Liu, & Zhang, 2021). No Japão, a robótica e as estufas inteligentes ajudam a mitigar a escassez de mão de obra devido ao envelhecimento da população agrícola, aumentando a eficiência e reduzindo o uso de insumos (Chen, Wu, & Zhu, 2020). A Coreia do Sul aplica tecnologias de IoT para monitoramento em tempo real da umidade e saúde das plantas, otimizando recursos com apoio de políticas governamentais focadas em sustentabilidade (Park & Oh, 2019). Na Índia, onde predominam pequenos produtores, o foco está no uso sustentável de água e fertilizantes por meio de sistemas de irrigação de precisão e drones para mapeamento de solo, apoiados por programas de capacitação técnica (Jat et al., 2021). Os investimentos em infraestrutura digital e políticas de incentivo sustentam a expansão da agricultura inteligente na Ásia, buscando segurança alimentar e maior autossuficiência (Yuan & Wang, 2019). Contudo, desafios como infraestrutura digital limitada e altos custos de implementação ainda restringem a adoção plena, tornando o apoio técnico e subsídios essenciais para democratizar o acesso e promover práticas agrícolas mais sustentáveis e adaptadas às condições locais (Singh & Singh, 2021).

3.1.4. Oceania

Na Oceania, a Austrália lidera a adoção de práticas de agricultura inteligente, especialmente nos setores de grãos e pecuária. Tecnologias como drones e sensores são amplamente aplicadas para monitoramento e otimização de recursos, permitindo aos produtores australianos ajustarem o uso de insumos de acordo com as condições ambientais e de produção (Kingwell & Xayavong, 2020). Na Nova Zelândia, a agricultura inteligente tem foco na pecuária, utilizando sensores e monitoramento remoto para gerenciar pastagens e a saúde

animal, o que contribui para melhorar a eficiência e o bem-estar dos rebanhos (Eastwood et al., 2017). O governo australiano tem apoiado a adoção dessas tecnologias em regiões remotas, com programas de transformação digital que buscam melhorar a conectividade e o acesso a ferramentas tecnológicas. Na Nova Zelândia, a sustentabilidade e eficiência da agricultura inteligente são promovidas por meio de parcerias público-privadas, que incentivam o desenvolvimento de soluções tecnológicas alinhadas às necessidades do setor agrícola (Higgins & Bryant, 2020; Sewell et al., 2018). Apesar dos avanços, custos iniciais elevados e limitações de infraestrutura digital em áreas rurais representam barreiras significativas para pequenas propriedades, dificultando a expansão dessas tecnologias em operações de menor escala (Navarro et al., 2020; Klerkx et al., 2019).

3.1.5. África

Na África, a agricultura inteligente está em fase inicial, com avanços promissores em países como Quênia, África do Sul e Gana. Nessas regiões, tecnologias como aplicativos móveis e serviços digitais facilitam o acesso a informações essenciais sobre previsões climáticas, controle de pragas e boas práticas de manejo, apoiando a segurança alimentar e aumentando a produtividade em comunidades agrícolas (Ndirangu et al., 2021). Na África do Sul, o uso de sensores de umidade e drones para monitoramento expande a agricultura de precisão em frutas e grãos, ajudando agricultores a ajustar práticas de irrigação e fertilização para otimizar o rendimento (Chanza & Musakwa, 2020). ONGs e organizações internacionais são fundamentais para financiar e implementar essas tecnologias. Iniciativas como a Aliança para uma Revolução Verde na África (AGRA) promovem ferramentas digitais para aumentar a produtividade e fortalecer a resiliência agrícola frente às mudanças climáticas e variações de solo e água (Maree et al., 2020). Na Etiópia, projetos de agricultura digital apoiados pelo Banco Mundial melhoram a eficiência produtiva, fornecendo treinamento técnico e ferramentas digitais a pequenos produtores (Birner & Resnick, 2019).

Apesar disso, a falta de infraestrutura digital, os altos custos de implementação e a escassez de profissionais qualificados são barreiras significativas. Agricultores em áreas rurais enfrentam dificuldades de acesso a internet estável, essencial para monitoramento e análise de dados em tempo real (Klerkx et al., 2019). Além disso, a fragmentação de propriedades e a prevalência de pequenos agricultores dificultam a adoção de tecnologias avançadas, que geralmente requerem escala e capital para máxima eficiência (Chanza & Musakwa, 2020).

3.1.6. América Central e América Latina Hispânica

Na América Latina hispânica, a Argentina lidera a adoção de tecnologias de precisão em grandes propriedades agrícolas, especialmente nas fazendas de grãos. A integração de GPS e sistemas de irrigação automatizada tem permitido aos agricultores argentinos otimizar a aplicação de insumos e reduzir o uso excessivo de água e fertilizantes, o que resulta em maior produtividade e menor impacto ambiental (Álvarez et al., 2018). No Chile, a agricultura inteligente concentra-se na viticultura e na produção de frutas, setores críticos para a economia local e altamente vulneráveis à escassez hídrica. Tecnologias de monitoramento, como sensores

de umidade do solo e ferramentas de previsão climática, têm sido utilizadas para gerenciar o uso da água e adaptar as práticas agrícolas às condições climáticas variáveis (Salazar et al., 2020).

Governos na região incentivam a inovação agrícola por meio de subsídios e parcerias público-privadas, promovendo o desenvolvimento de infraestrutura digital e o acesso a tecnologias avançadas. Contudo, limitações na infraestrutura digital, falta de treinamento técnico e acesso restrito a financiamento limitam a adoção de tecnologias de precisão entre pequenos agricultores (Muñoz & Rivera, 2021; Reyes & Trivelli, 2020). Muitos pequenos produtores enfrentam dificuldades em acessar crédito para investir em tecnologias de agricultura inteligente e carecem de capacitação técnica para utilizá-las de forma eficaz.

3.1.7. Brasil

O Brasil, um dos maiores produtores agrícolas do mundo, destaca-se na adoção de tecnologias agrícolas inteligentes, especialmente na região Centro-Oeste, onde o agronegócio domina. A produção em larga escala de soja, milho e algodão nessa região é amplamente beneficiada por práticas de agricultura de precisão e tecnologias avançadas. Grandes agronegócios adotam sistemas integrados, incluindo monitoramento via satélite, irrigação automatizada e plataformas de gestão unificada, que maximizam a produtividade e a eficiência ao longo de todo o processo agrícola. Em contraste, pequenos e médios produtores enfrentam limitações financeiras e de infraestrutura, adotando tecnologias de forma mais fragmentada, o que reduz o potencial dos benefícios oferecidos pela agricultura inteligente (Pivoto et al., 2019; Borghi et al., 2021; Molin et al., 2020). Como apontam Rodrigues e Victoria (2019), a integração das tecnologias é essencial para otimizar a eficiência e maximizar os resultados.

3.1.7.1. Incentivos para adoção

A posição do Brasil como líder na exportação de soja e milho impulsiona o agronegócio a investir em tecnologias inteligentes, visando aumentar a produtividade e a competitividade internacional (Borghi et al., 2021). Programas governamentais como o Plano ABC+ e iniciativas lideradas pela Embrapa incentivam a adoção de tecnologias sustentáveis, com foco em práticas de manejo hídrico e fertilização de precisão, que são fundamentais para os cultivos em larga escala do Centro-Oeste (Andrade et al., 2021). Além disso, a abundância de recursos naturais na região, como luz solar e disponibilidade hídrica, cria condições ideais para o uso de tecnologias que otimizam a eficiência no uso da água e dos insumos, como sistemas de irrigação automatizados e sensores de umidade (Fernandes et al., 2020). A Embrapa e o setor privado também desempenham um papel crucial, investindo no desenvolvimento de tecnologias adaptadas ao contexto brasileiro e fortalecendo a competitividade do país no mercado global (Borges & Lansink, 2020).

3.1.7.2. Barreiras à adoção

Embora a agricultura inteligente ofereça benefícios claros para a produtividade e eficiência, pequenos e médios produtores no Brasil enfrentam desafios significativos para sua adoção. Um dos principais obstáculos é o elevado custo inicial para aquisição de tecnologias

como sistemas GPS, drones e sensores de precisão, que demandam investimentos altos e geralmente estão fora do alcance dos pequenos agricultores com margens de lucro reduzidas. Esses custos tornam essas tecnologias mais acessíveis para grandes agronegócios, que dispõem de maior capacidade financeira, enquanto os menores produtores lutam para justificar esses investimentos e permanecem tecnologicamente defasados (Pivoto et al., 2019; Marques et al., 2021). Outro problema central é a infraestrutura digital insuficiente nas áreas rurais, especialmente no Centro-Oeste brasileiro, onde grande parte da produção agrícola é concentrada. Muitas dessas tecnologias exigem conectividade estável para o monitoramento em tempo real, coleta de dados e análise remota. Contudo, a falta de internet de alta velocidade nessas regiões limita o funcionamento ideal dos sistemas de precisão, prejudicando o uso eficaz e, conseqüentemente, a competitividade dos pequenos produtores em comparação com grandes operações tecnologicamente equipadas (Cunha et al., 2020).

Além das limitações financeiras e de infraestrutura, a falta de capacitação técnica é uma barreira importante para pequenos e médios produtores, que geralmente carecem de acesso a treinamentos específicos e suporte técnico contínuo. Grandes empresas agrícolas têm maior facilidade em obter capacitação para o uso e análise de dados provenientes dessas tecnologias, mas os menores produtores frequentemente enfrentam dificuldades para operar e interpretar informações geradas por sensores e softwares, reduzindo o impacto das ferramentas de precisão na prática agrícola (Silva et al., 2011; Santos & Silva, 2020).

3.1.7.3. Sistemas de cultivo e agricultura inteligente

No Centro-Oeste brasileiro, a agricultura inteligente está fortemente associada aos cultivos de soja, milho e algodão, principais culturas da região. A soja, como cultura dominante, se beneficia do plantio de precisão, fertilização automatizada e monitoramento por drones, práticas que aumentam a eficiência dos insumos e reduzem o impacto ambiental (Pivoto et al., 2018; Oliveira et al., 2020). Na produção de milho, sensores de umidade, irrigação automatizada e máquinas com GPS ajudam a ajustar o uso de água e insumos conforme a necessidade das plantas, aumentando a resiliência das safras e minimizando o desperdício (Silva et al., 2011; Almeida & Costa, 2019). Já o algodão, que demanda mais insumos, utiliza tecnologias como irrigação por gotejamento e monitoramento remoto para melhorar a eficiência e reduzir o desperdício, promovendo práticas sustentáveis (Borghi et al., 2021; Santos et al., 2021).

Essas práticas refletem uma estratégia para tornar a produção agrícola do Centro-Oeste mais competitiva e sustentável, atendendo tanto às exigências ambientais quanto às demandas de mercado.

3.1.7.4. Recursos naturais e sustentabilidade

O Centro-Oeste brasileiro possui uma abundância de recursos naturais, como luz solar intensa e chuvas regulares, que favorece a adoção de tecnologias inteligentes para garantir a sustentabilidade agrícola a longo prazo. Embora a região seja rica em água doce, a crescente demanda hídrica de culturas como algodão e milho torna essencial o uso de tecnologias que permitam um gerenciamento eficiente. Sistemas de irrigação avançados e sensores de umidade do solo são fundamentais para monitorar e ajustar o uso de água, evitando a sobrecarga e

degradação dos recursos hídricos (Oliveira et al., 2020). A alta incidência de luz solar permite um controle preciso do plantio e colheita, maximizando a produtividade e contribuindo para o desempenho sustentável da agricultura regional (Pivoto et al., 2019). A variabilidade climática, intensificada pelas mudanças climáticas, torna a gestão hídrica e o monitoramento das condições do solo ainda mais cruciais para garantir a resiliência e continuidade das safras (Silva et al., 2011; Almeida & Costa, 2019).

3.1.8. Evolução da agricultura inteligente pelos múltiplos cenários aqui analisados

A agricultura inteligente evolui sob duas abordagens principais: a adoção de tecnologias isoladas e a gestão integrada. Em várias regiões, incluindo o Centro-Oeste brasileiro (Tabela 1), prevalece o uso de tecnologias isoladas como monitoramento por satélite e plantio de precisão, que aumentam a produtividade, mas apresentam benefícios limitados sem uma integração completa. Em países desenvolvidos como América do Norte e Europa, a agricultura inteligente opera predominantemente como um sistema de gestão integrada, maximizando a eficiência dos recursos e promovendo práticas sustentáveis. Na América do Norte, subsídios e investimentos privados impulsionam a adoção em grandes fazendas, onde a escala facilita a absorção dos altos custos. A Europa, com programas como a Política Agrícola Comum (PAC) e o Horizonte 2020, lidera em inovação e sustentabilidade, embora os custos e a infraestrutura ainda limitem a adoção em pequenas propriedades. Na Ásia, países como China e Japão lideram com monitoramento de solo e robótica, enquanto o Sudeste Asiático enfrenta obstáculos de infraestrutura e financiamento. Na Oceania, a Austrália foca na agricultura de precisão para grãos e pecuária, e a Nova Zelândia adota práticas sustentáveis na pecuária, embora a infraestrutura digital limitada dificulte a implementação em propriedades menores. Na África, a agricultura inteligente está em estágio inicial, com poucos avanços devido à falta de infraestrutura e recursos financeiros. Na América Latina hispânica, a Argentina lidera em tecnologias de precisão em fazendas de grãos, e o Chile investe na viticultura e produção de frutas, apesar das limitações de treinamento e financiamento para pequenos produtores.

No Brasil, o potencial para a agricultura inteligente é grande, especialmente para a soja, milho e algodão no Centro-Oeste. No entanto, pequenos agricultores enfrentam desafios de custo e infraestrutura, restringindo uma adoção plena e integrada.

Tabela 1 – A agricultura inteligente por múltiplos cenários

Região	Abordagem Principal	Tecnologias/Práticas	Incentivos/Apoios	Desafios
América do Norte	Sistema de gestão integrado em grandes fazendas	Satélites, análise de dados, drones	USDA, incentivos fiscais, investimento privado	Custos iniciais altos, barreiras para pequenas fazendas
Europa	Automação e sustentabilidade, sistema de gestão integrado	IoT, robótica, análise ambiental	PAC, Horizonte 2020, apoio rural	Custos elevados, falta de infraestrutura em regiões menos desenvolvidas
Ásia	Adaptação tecnológica às necessidades locais	Robótica no Japão, sensores de solo na China, irrigação na Índia	Políticas governamentais, infraestrutura digital	Custo e infraestrutura limitada no Sudeste Asiático
Oceania	Agricultura de precisão em grãos e pecuária	Sensores, monitoramento remoto, drones	Transformação digital, parcerias público-privadas	Infraestrutura digital limitada, altos custos para pequenas fazendas
África	Fase inicial com foco em aplicativos móveis e sustentabilidade	Previsões meteorológicas, controle de pragas, sensores de solo	ONGs, Aliança para uma Revolução Verde na África	Baixa infraestrutura digital, financiamento e capacitação técnica
América Latina Hispânica	Agricultura de precisão em grandes propriedades	GPS, sistemas de irrigação, monitoramento hídrico	Subsídios governamentais, parcerias público-privadas	Infraestrutura limitada, financiamento restrito para pequenos agricultores
Brasil (Centro-Oeste)	Agricultura de precisão com grandes culturas	Plantio de precisão, irrigação automatizada, monitoramento remoto	Embrapa, Plano ABC+, incentivos estaduais	Altos custos, falta de capacitação e conectividade

4 LACUNAS NA LITERATURA

Faltam estudos sobre o desenvolvimento de infraestrutura digital em áreas rurais, especialmente no Brasil e na África, onde a conectividade limitada restringe o uso eficaz de tecnologias agrícolas. Há também pouca pesquisa sobre a governança de dados, especialmente em relação à privacidade e propriedade dos dados agrícolas, permanece uma questão pouco explorada. A literatura muitas vezes não diferencia a adoção de tecnologias isoladas da implementação da agricultura inteligente como um sistema de gestão integrado, gerando confusão e dificultando estratégias adequadas para cada abordagem. Essas lacunas indicam a necessidade de mais estudos focados para tratar dessas lacunas.

5 CONCLUSÃO

A literatura indica que a agricultura inteligente é fundamental para enfrentar desafios de segurança alimentar, sustentabilidade e gestão de recursos na agricultura global. Contudo, a adoção varia significativamente: enquanto países desenvolvidos avançam em sistemas integrados, regiões em desenvolvimento ainda enfrentam barreiras como limitações financeiras, infraestrutura digital insuficiente e falta de capacitação.

Este estudo identificou duas abordagens na agricultura inteligente: o uso de tecnologias isoladas e a gestão integrada. Em regiões em desenvolvimento, prevalece a adoção fragmentada, com ganhos limitados por ferramentas específicas, sem alcançar o potencial pleno de um sistema integrado. A falta de conscientização sobre os benefícios da agricultura inteligente integrada acentua essa fragmentação, especialmente entre pequenos agricultores. Nos países desenvolvidos, a agricultura inteligente é aplicada como um sistema de gestão eficiente e sustentável, com claros benefícios econômicos e ambientais, notadamente em grandes operações da América do Norte, Europa e Austrália. No Brasil, especialmente no Centro-Oeste, há grande potencial para culturas de soja, milho e algodão; no entanto, pequenos agricultores ainda enfrentam desafios como custos elevados e baixa conscientização sobre os benefícios de uma gestão tecnológica integrada.

6 PESQUISAS FUTURAS

Pesquisas futuras devem focar em estratégias para que pequenos agricultores em regiões de recursos limitados superem barreiras financeiras e de infraestrutura, possibilitando a adoção da agricultura inteligente como sistema de gestão. É crucial investigar soluções para os desafios de infraestrutura, financiamento e capacitação técnica que restringem o uso de tecnologias inteligentes em áreas subdesenvolvidas, ampliando assim os benefícios dessa transformação agrícola para promover segurança alimentar e sustentabilidade ambiental em escala global.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S.; DE PAEPE, J. L. Agricultura de precisión en el cultivo de granos en Argentina. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**, v. 50, n. 2, p. 291-301, 2018.

BALAFOUTIS, A. et al. Smart farming technologies—Description, taxonomy and economic impact. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 136-143, 2017.

BIRNER, R.; RESNICK, D. The political economy of policies for smallholder agriculture. **World Development**, v. 38, n. 10, p. 1442-1455, 2019.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 359-387, 2004.

BORGHI, E.; LANSINK, A. O. Effects of smart farming technology on sustainability performance in Brazilian agriculture. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102713, 2020.

BRONSON, K. Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90, p. 100294, 2019.

CHANZA, N.; MUSAKWA, W. Local governance and climate change adaptation in Southern Africa. **Journal of Environmental Management**, v. 259, p. 109699, 2020.

CUNHA, M. et al. The impact of IoT on sustainable agriculture in Brazil. **Agriculture**, v. 10, n. 9, p. 391, 2020.

EASTWOOD, C. et al. Managing socio-technical networks: Tools of the trade for the digital age of agriculture. **Journal of Rural Studies**, v. 54, p. 80-99, 2017.

EASTWOOD, C.; RENWICK, A. Adoption of smart farming in the North American context. **Agricultural Systems**, v. 180, p. 102769, 2020.

FOUNTAS, S. et al. Precision agriculture: The experience of Greece and the European perspective. **European Journal of Agronomy**, v. 59, p. 59-69, 2015.

HIGGINS, V.; BRYANT, M. Digital agriculture in Australia and New Zealand: Successes and challenges. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102739, 2020.

JAT, R. K. et al. Climate smart agriculture in India: A policy perspective. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 90, n. 4, p. 542-548, 2021.

KLERKX, L.; JAKKU, E.; LABARTHE, P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90, p. 100315, 2019.

LAMBERT, D. M.; JENNINGS, T. J.; ROBERTS, R. K. Factors affecting precision agriculture adoption in the southeastern United States. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 44, n. 3, p. 390-410, 2015.

LI, X.; LIU, J.; ZHANG, W. Smart farming applications in Chinese agriculture. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 5, p. 1301-1314, 2021.

MAREE, A.; MAREE, M.; MTATI, M. T. The role of technology and innovation in achieving the agricultural goals of the African Union's Agenda 2063. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 12, n. 3, p. 345-355, 2020.

MILLER, M.; ARNOLD, T.; HULTQUIST, A. Precision agriculture technology in North America: Adoption and impacts. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 171-177, 2019.

MUÑOZ, M.; RIVERA, M. Smart farming and rural development in Central America. **Development in Practice**, v. 31, n. 7, p. 900-913, 2021.

NDIRANGU, P. W.; MUTAI, B.; MWANGI, H. W. Agricultural mobile applications and their role in smart farming in Kenya. **Information Processing in Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 345-357, 2021.

OLIVEIRA, A.; RIBEIRO, A.; CUNHA, M. Technological advances in Brazilian agriculture and its impact on soybean production. **Journal of Agronomy**, v. 19, n. 3, p. 261-268, 2020.

PAUSTIAN, M.; THEUVSEN, L. Adoption of smart farming in Germany: A decision-theoretic analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 142, p. 224-239, 2017.

PIVOTO, D. et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. **Information Processing in Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 21-32, 2018.

REICHARDT, M.; JÜRGENS, C. Adoption and future perspective of precision farming in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 73-94, 2009.

REYES, M.; TRIVELLI, C. Smallholder farmers and smart agriculture: Challenges in Latin America. **Development Policy Review**, v. 38, n. 5, p. 659-673, 2020.

RELF-ECKSTEIN, J.; BALLANTYNE, E.; PHILLIPS, P. W. Precision agriculture and the future of farming in Canada. **Journal of Agriculture and Environmental Ethics**, v. 32, n. 4, p. 511-531, 2019.

SALAZAR, M.; ROJAS, J. Water scarcity and smart agriculture practices in Chilean vineyards. **Journal of Wine Economics**, v. 15, n. 3, p. 335-350, 2020.

SCHIMMELPFENNIG, D. Farm profits and adoption of precision agriculture. **Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture**, Report No. 217, 2016.

SILVA, E. L.; SANTOS, J. P. Training and capacity-building challenges for smallholders in Brazil. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 8, n. 4, p. 489-503, 2020.

TEY, Y. S.; BRINDAL, M. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: A review for policy implications. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 713-730, 2012.

WOLFERT, S. et al. Big data in smart farming: A review. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 69-80, 2017.

YUAN, Y.; WANG, J. Impact of smart agriculture in food security in China. **Agricultural Economics**, v. 65, n. 7, p. 355-362, 2019.